Vol. 20 No. 5 天文研究与技术 第 20 卷 第 5 期
Sep., 2023 ASTRONOMICAL RESEARCH & TECHNOLOGY 2023 年 9 月

DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230517.002

两类伽马暴 X 射线余辉光变特性的比较研究

蒙　建，彭朝阳*，陈家明
（云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明　650500）

摘要：伽马射线暴（Gamma-Ray Bursts，GRBs）的分类是伽马暴领域未解决的热点问题，为了解决这个问题，我们搜集了 Swift 观测具有缓慢衰减和随后衰减特征的 X 射线余辉光变曲线样本（180 个已知红移的伽马暴），其中长伽马暴（Long Gamma-Ray Bursts，LGRBs）172 个，短伽马暴（Short Gamma-Ray Bursts，SGRBs）8 个，并选择平滑拐折幂律函数使用马尔可夫链蒙特卡罗（Markov Chain Monte Carlo，MCMC）方法拟合了这些 X 射线余辉光变曲线，获得光变特性参数后，分析两类暴的光变特性参数 α_1（缓慢衰减指数）、α_2（正常衰减指数）、T_a（静止系下缓慢衰减结束时间）的分布是否存在差异以及两类暴是否遵循相同的相关关系。研究发现，（1）两类暴的光变特性参数 α_1，α_2 和 T_a 的分布范围、中值和平均值都非常接近，没有显示出明显的不同，随后的 K-S 检验结果进一步表明，这两类暴的光变特性参数分布没有显著差异。（2）我们选取的两类暴均遵循如下相关关系：L_x-T_a，L_x-$E_{\gamma,iso}$，S-T_{90}和 $E_{\gamma,iso}$-T_{90}，而且它们在散点图上不可区分。这些统计结果表明，两类暴的这些光变特性是相似的，因而，我们推断两类伽马暴具有同一物理起源，它们的喷流结构也可能相同。

关键词：伽马射线暴；X 射线余辉；光变曲线拟合；数据分析
中图分类号：P172　**文献标识码**：A　**文章编号**：1672-7673(2023)05-0369-14

伽马射线暴（简称伽马暴）是宇宙中短暂、强烈的伽马射线闪光，持续时间从几毫秒到几千秒不等[1-3]。根据持续时间和光谱硬度比的分布，伽马暴可以分为两类：长伽马暴（T_{90} < 2 s，通常持续 20~30 s）和短伽马暴（SGRBs，T_{90}<2 s，通常持续 0.2~0.3 s）[4-5]。通常认为，长伽马暴起源于大质量恒星的塌缩[6-8]，短伽马暴起源于两颗致密恒星的并合，尤其是两颗中子星（NS-NS）[9]或一颗中子星和一个黑洞（NS-BH）[10]。对于 GRB 170817A 相关的引力波事件 GW 170817 的检测证实，至少有一部分观测到的短伽马暴是由双中子星并合产生的[11-12]。

目前已认识到伽马射线暴包含两个现象的辐射阶段：瞬时辐射（瞬时伽马射线辐射）和余辉阶段（瞬时后的长持续、宽能带辐射）[13]。火球激波模型广泛应用于解释伽马射线暴的起源[14-18]。研究发现，瞬时辐射由火球喷射物相互作用引起的内部激波产生，而余辉辐射由火球喷射物与星际介质相互作用引起的外部激波产生[19-25]。1997 年，BeppoSAX 卫星凭借精确的定位能力首次探测到伽马射线暴的 X 射线余辉，同时还检测到伽马暴的光学和射电余辉，使伽马暴的定位得以精确。文[26]首次测量 GRB 970505 的红移为 0.835，证明伽马射线暴起源于宇宙距离，后来甚至观测到红移~10[27]。

随着 Swift 卫星的成功发射，研究人员发现了早期 X 射线余辉的许多特殊特征，例如 X 射线耀发和缓慢衰减成分[28-29]。文[28]提出了具有 5 个阶段典型的 X 射线余辉光变曲线，包括快速衰减成分、缓慢衰减成分、正常衰减成分、后喷流拐折成分和 X 射线耀发。通常认为，缓慢衰减阶段是一些额外的能量注入。这可能是由于长期的中央发动机持续释放的能量[30-36]。因此，人们相信 X 射线余辉缓慢衰减可能有助于确定伽马射线暴不同中央引擎的类型。其中一个广泛接受的理论是具有 X 射线

基金项目：国家自然科学基金（12163007）资助.
收稿日期：2023-03-28；修订日期：2023-04-02
作者简介：蒙　建，男，硕士研究生，主要研究伽马射线暴. Email：3091114918@qq.com.
* 通信作者：彭朝阳，男，教授，主要研究伽马射线暴. Email：pengzhaoyang412@163.com.

缓慢衰减阶段的伽马射线暴中心发动机是一个快速旋转的磁星，在瞬时辐射后继续辐射能量[30,37-41]。令人惊讶的是，在缓慢衰减阶段结束后，人们还发现了另一种特殊的缓慢衰减(所谓的"内部平台")，它具有一段及其快速的衰减(衰减指数通常小于-3)。一种公认的解释是，"内部平台"是由于"超大质量"中子星的持续能量供应。中子星最终会在自转或回落吸积的作用下塌缩成黑洞，导致中央发动机突然关闭[32-33,35,42-46]。与"内部平台"相反，通常称为"外部平台"的缓慢衰减后的正常衰减，这可以很好地解释为外部激波的减速。

在具有 X 射线余辉缓慢衰减阶段的伽马射线暴中，研究人员发现了几个重要的相关性。首先，文[47]分析了 77 个伽马射线暴，发现在静止坐标系下慢衰减阶段的结束时间($T_{a,z}$)与此时对应的 X 射线光度($L_{x,a}$)之间存在负相关关系，$L_{x,a}\propto T_{a,z}^{-1.06\pm0.27}$[48]。然后，通过使用具有已知红移的 62 个 Swift 长伽马暴样本，他们将其扩展到余辉与瞬时辐射之间，并发现 $L_{x,a}$ 与瞬时辐射平均光度 $L_{p,45}$ 也存在相关性，即 $L_{x,a}\propto L_{p,45}^{0.7}$[49]。文[50]进一步发现 $T_{a,z}$，$L_{x,a}$ 和瞬时辐射的各向同性能量($E_{\gamma,iso}$)之间存在更紧密的三参数相关性。文[51]建立了瞬时辐射 $T_{a,z}$，$L_{x,a}$ 和峰值光度(L_p)之间的另一个三参数相关性。然后由文[52]证实扩展了 183 个伽马射线暴的样本。文[53]分析了 50 个在光学余辉光变曲线中具有缓慢衰减阶段的伽马射线暴发现，样本具有相似的三参数 L-T-E 相关性。后来，文[54]分析了 174 个具有缓慢衰减阶段和已知红移的 Swift 伽马暴的大样本，并测试了 L-T-E 的相关性，进一步证实了这一相关性，并得出结论：$L_{x,a}\propto T_{a,z}^{-1.01\pm0.05}E_{\gamma,iso}^{0.84\pm0.04}$。

然而，前人的研究并没有详细分析和系统比较具有缓慢下降阶段两类暴的 X 射线余辉光变特性，而目前伽马暴的分类问题还是一个未解决的热点问题。在这项工作中，我们从两类伽马暴余辉的光变特性出发，系统收集 X 射线余辉光变曲线数据作为研究样本，重点关注 X 射线衰减后的阶段，统计两类暴平台后面的拐折情况，哪类暴更倾向于有这样的平台。我们使用平滑拐折幂律函数模型对两类伽马暴的 X 射线余辉光变曲线进行拟合，得到缓慢下降阶段的相关参数，从统计上分析两类伽马暴的缓慢下降阶段光变特性的异同，为推断伽马暴的物理起源、暴周环境、前身星、辐射机制等问题提供帮助。本文采用平坦 ΛCDM 宇宙学模型，$H_0=70.0\ \mathrm{km\cdot s^{-1}\cdot Mpc^{-1}}$ 和 $\Omega_M=1-\Omega_\Lambda=0.286$ 计算 $D_L(z)$。

1 样本选择和数据分析

Swift 在 2004 年成功升空后[55]，很快就发现了伽马暴 X 射线余辉许多有趣的特性，包括 X 射线耀发和缓慢下降阶段。我们主要分析 Swift XRT 探测到有缓慢下降以及随后正常下降阶段的伽马暴。我们选取从 2005 年 3 月到 2022 年 5 月的伽马暴，所有伽马暴都测量到红移，能量范围在 0.3~10 keV。

从 Swift-XRT 伽马暴光变曲线库(https://www.swift.ac.uk/xrt_curves/)中，我们根据以下标准筛选符合要求的伽马暴：

(1)缓慢下降阶段比较明显，因此要求缓慢下降阶段的幂律指数在-1.0 到 1.0 的范围内；

(2)缓慢下降阶段的数据足够丰富，既能显示缓慢下降阶段的结构，又能显示缓慢下降阶段的结束时间；

(3)缓慢下降阶段不应该有耀发，因为有耀发会增大我们拟合的难度，即使选取的样本中含有耀发，我们也只取其缓慢下降阶段以及衰减之后的数据进行拟合；

(4)样本的红移已知，这样我们就可以计算 γ 射线释放的各向同性能量($E_{\gamma,iso}$)，并且还能够考虑时间膨胀效应推导内在 T_a 参数。

通过以上 4 个标准，我们最终获得了 180 个伽马射线暴样本，其中长暴有 172 个，短暴有 8 个。我们的样本是目前包含缓慢衰减以及已知红移测量的最大伽马射线暴样本，样本的红移范围为(0.036 8，8.0)，T_{90}的范围为(0.18，549.9)。样本中短伽马暴的红移、T_{90}见表 1。

文[56-57]用平滑拐折幂律函数拟合这些具有平台期以及随后正常下降阶段的伽马暴，我们也采用该模型对样本进行拟合，

$$F_X(t) = F_{X0}\left[\left(\frac{t}{T_0}\right)^{\alpha_1\omega} + \left(\frac{t}{T_0}\right)^{\alpha_2\omega}\right]^{-1/\omega}, \tag{1}$$

其中，α_1 为平台期下降指数，通常典型值应该接近 0；α_2 描述了随后的正常下降阶段；T_0 为观察到平台期的结束时间，伽马射线暴静止系下的结束时间可由 $T_a = T_0/(1+z)$ 得到；$F_{X0} \times 2^{-1/\omega}$ 为平台期末端对应的通量；ω 表示光变曲线锐度参数，表征从平台期向随后下降阶段转变的锐度。

我们采用马尔可夫链蒙特卡罗方法，以及卡方检验获得拟合 X 射线余辉光变曲线的最优结果。卡方检验的数学公式为

$$\chi^2 = \sum_{1}^{N_{bin}} \frac{[F_{obs}(t_i) - F_{model}(t_i)]^2}{[\delta F_{obs}(t_i)]^2}, \tag{2}$$

其中，$F_{obs}(t_i)$是观察到的时间 t_i 通量；$\delta F_{obs}(t_i)$是置信度水平下的相应误差。

表 1　我们样本中包含的 8 个短伽马暴

Table 1　8 short GRBs in our sample

GRB Name	T_{90} /s	z
GRB 051221A	1. 40	0. 547
GRB 061201	0. 76	0. 111
GRB 070809	1. 30	0. 220
GRB 090510	0. 30	0. 903
GRB 130603B	0. 18	0. 356
GRB 140903A	0. 30	0. 351
GRB 150423A	0. 22	1. 394
GRB 190627A	1. 60	1. 942

图 1 显示了部分拟合结果。通过拟合我们得到了平台阶段衰减指数 α_1，以及缓慢下降阶段的衰减指数 α_2，平台期结束时间 T_0 和平台衰减流量 F_{X0}，部分暴的拟合数据见表 2。

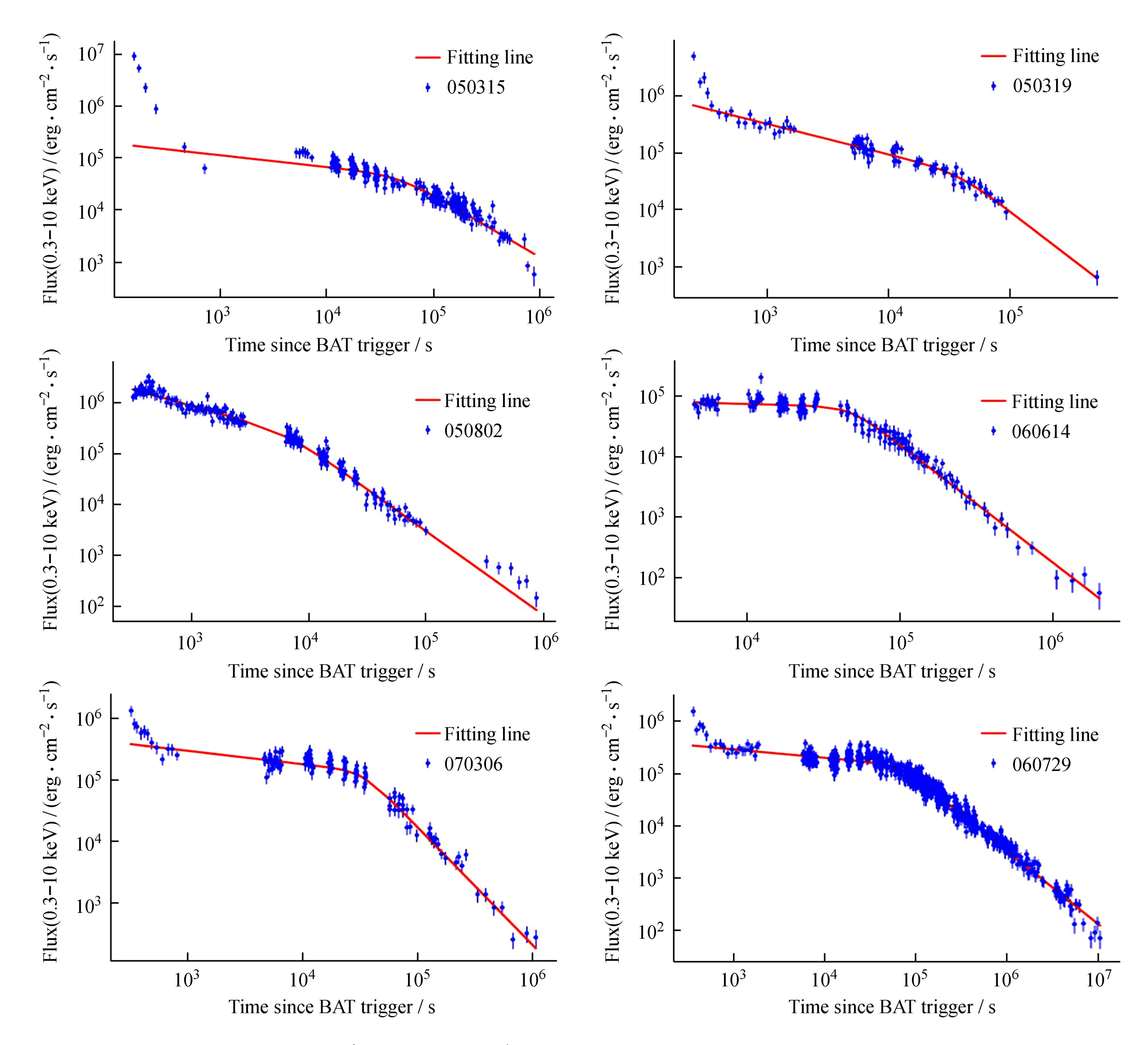


图 1　几个具有平台与随后正常下降阶段的 X 射线余辉光变曲线的拟合结果

Fig. 1　Example fitting results of X-ray afterglow light curves with platforms and subsequent normal decay phase

表 2 部分伽马暴余辉光变曲线“缓慢下降”的拟合结果及参数

Table 2 Some fitting results and parameters of the GRBs afterglow light curve with “slow descending”

GRB Name	T_{90}[a]	z	S[b]	α_1	α_2	Log ($T_a/10^3$)[c]	Log ($L_X/10^{47}$)[d]	log ($E'_{\gamma,\mathrm{iso}}/10^{53}$)[e]	Log ($E_{\gamma,\mathrm{iso}}/10^{53}$)[f]	χ^2/dof
GRB 050315	95. 6	1. 949	32. 2±1. 46	0. 227±0. 051	1. 202±0. 087	1. 22±0. 26	0. 49±1. 04	−0. 52±0. 05	−0. 49±0. 05	1. 83
GRB 050319	152. 5	3. 24	13. 1±1. 48	0. 535±0. 030	1. 640±0. 242	0. 96±0. 18	1. 18±0. 39	−0. 53±0. 11	−0. 49±0. 11	1. 34
GRB 050401	33. 3	2. 9	82. 2±3. 06	0. 582±0. 028	1. 514±0. 095	0. 18±0. 19	2. 02±0. 12	0. 19±0. 04	0. 22±0. 04	1. 16
GRB 050416A	2. 5	0. 653 5	3. 67±0. 37	0. 570±0. 037	0. 937±0. 025	0. 38±0. 41	−0. 7±0. 29	−2. 38±0. 1	−2. 37±0. 1	1. 08
GRB 050505	58. 9	4. 27	24. 9±1. 79	0. 538±0. 049	0. 932±0. 033	−0. 21±0. 45	1. 9±0. 23	−0. 06±0. 07	−0. 02±0. 07	1. 15
GRB 050730	156. 5	3. 97	23. 8±1. 52	0. 437±0. 012	2. 496±0. 043	0. 23±0. 03	2. 77±0. 71	−0. 13±0. 06	−0. 09±0. 06	3. 23
GRB 050802	19	1. 71	20±1. 57	0. 645±0. 031	1. 654±0. 048	0. 39±0. 13	0. 99±0. 15	−0. 83±0. 08	−0. 81±0. 08	1. 18
GRB 050803	87. 9	0. 422	21. 5±1. 35	0. 610±0. 033	1. 526±0. 076	1. 01±0. 19	−1. 13±1. 51	−2. 01±0. 06	−2. 01±0. 06	3. 51
GRB 050814	150. 9	5. 3	20. 1±2. 2	0. 622±0. 028	2. 198±0. 346	1. 11±0. 17	0. 93±0. 21	−0. 01±0. 11	0. 05±0. 11	1. 58
GRB 050824	22. 6	0. 83	2. 66±0. 52	0. 292±0. 092	0. 916±0. 090	1. 55±0. 67	−1. 39±0. 35	−2. 31±0. 2	−2. 3±0. 2	1. 43
GRB 051016B	4	0. 936 4	1. 7±0. 22	0. 410±0. 039	1. 326±0. 072	1. 12±0. 2	−0. 93±0. 22	−2. 4±0. 13	−2. 39±0. 13	1. 14
GRB 051109A	37. 2	2. 346	22±2. 72	0. 506±0. 036	1. 260±0. 019	0. 28±0. 16	1. 59±0. 19	−0. 54±0. 12	−0. 52±0. 12	1. 05
GRB 051109B	14. 3	0. 08	2. 56±0. 41	0. 221±0. 104	1. 355±0. 085	0. 49±0. 26	−3. 29±0. 19	−4. 43±0. 16	−4. 42±0. 16	1. 67
GRB 051221A	1. 4	0. 547	11. 5±0. 35	0. 636±0. 041	1. 553±0. 136	1. 57±0. 28	−2. 04±0. 51	−2. 05±0. 03	−2. 04±0. 03	1. 65
GRB 060108	14. 3	2. 03	3. 69±0. 37	0. 446±0. 052	1. 292±0. 107	0. 87±0. 36	−0. 01±0. 27	−1. 43±0. 1	−1. 4±0. 1	1. 85
GRB 060115	139. 6	3. 53	17. 1±1. 5	0. 608±0. 055	1. 491±0. 196	0. 93±0. 37	0. 53±0. 34	−0. 35±0. 09	−0. 32±0. 09	1. 13
GRB 060202	198. 9	0. 78	21. 3±1. 65	0. 951±0. 028	0. 952±0. 028	0. 44±0. 36	−0. 2±0. 34	−1. 46±−0. 08	−1. 46±0. 08	2. 01
GRB 060708	10. 2	2. 3	4. 94±0. 37	0. 585±0. 043	1. 288±0. 049	0. 38±0. 32	0. 87±0. 31	−1. 2±0. 07	−1. 18±0. 07	1. 21
GRB 060714	115	2. 71	28. 3±1. 67	0. 530±0. 067	1. 348±0. 057	0. 32±0. 28	1. 2±0. 35	−0. 32±0. 06	−0. 29±0. 06	1. 55
GRB 090529	100	2. 625	6. 8±1. 7	0. 507±0. 095	0. 996±0. 296	1. 0±2. 27	−0. 1±0. 9	−0. 97±0. 25	−0. 94±0. 25	1. 65
GRB 111008A	63. 46	5	53±3	0. 168±0. 101	1. 273±0. 045	−0. 06±0. 37	2. 66±0. 66	0. 38±0. 0 6	0. 43±0. 06	1. 12
GRB 111123A	290	3. 151 6	73±3	0. 820±0. 074	2. 118±0. 272	1. 02±0. 2	0. 73±0. 33	0. 2±0. 04	0. 23±0. 04	1. 51
GRB 111209A	320	0. 677	360±10	0. 318±0. 339	2. 504±1. 918	0. 44±2. 08	2. 0±0. 6	−0. 36±0. 03	−0. 35±0. 03	1. 36
GRB 130606A	276. 58	5. 913	29±2	0. 831±0. 125	1. 876±0. 159	0. 38±0. 3	1. 87±0. 43	0. 22±0. 07	0. 28±0. 07	0. 96

续表 2

GRB Name	T_{90} [a]	z	S [b]	α_1	α_2	Log ($T_a/10^3$) [c]	Log (L_X/ 10^{47}) [d]	log ($E'_{\gamma,iso}$/ 10^{53}) [e]	Log ($E_{\gamma,iso}$/ 10^{53}) [f]	χ^2 /dof
GRB 130612A	4	2.006	2.3±0.5	0.460±0.223	1.244±0.183	0.06±0.65	0.3±0.83	−1.64±0.22	−1.63±0.22	0.22
GRB 131030A	41.1	1.293	290±0	0.986±0.285	1.252±0.036	0.53±0.18	0.9±0.31	0.11±0	0.12±0	1.04
GRB 131103A	17.3	0.599	8.2±1	−0.243±0.608	1.097±0.040	−0.4±1.28	0.22±0.3	−2.11±0.12	−2.11±0.12	2.59
GRB 131105A	112.3	1.686	71±5	0.140±0.166	1.036±0.049	−0.07±0.36	1.09±0.35	−0.29±0.07	−0.27±0.07	1.65
GRB 140430A	173.6	1.6	11±2	0.675±0.077	1.314±0.811	1.26±0.64	−0.33±0.49	−1.14±0.18	−1.12±0.18	1.02
GRB 210610B	69.38	1.134 5	360±10	0.816±0.094	1.774±0.089	1.18±0.35	0.23±0.62	0.09±0.03	0.1±0.03	0.74
GRB 210731A	22.51	1.252 5	22±2	0.380±0.298	1.658±0.293	1.2±0.46	−0.37±0.68	−1.04±0.09	−1.04±0.09	0.42
GRB 220101A	173.36	4.618	250±0	0.324±0.085	1.332±0.012	−1.12±0.16	4.63±0.12	1.0±0	1.04±0	2.48
GRB 220117A	49.81	4.961	16±2	−0.007±0.272	1.639±0.190	−0.29±0.87	2.5±2.38	−0.15±0.12	−0.1±0.12	2.17
GRB 220521A	13.55	5.57	8.1±0.8	−0.326±0.147	1.734±0.131	−0.85±0.18	2.97±0.2	−0.37±0.1	−0.31±0.1	1.03

注释：[a]单位为 s，取自 Swift GRB 表 https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table.html/.；[b]单位为10^{-7} erg · cm^{-2}，取自 Swift GRB 表 https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table.html/.；[c]单位为10^3 s，用(1)式拟合结果，采用 MCMC 算法进行拟合；[d]单位为10^{47} erg · s^{-1}，用(1)式拟合结果，采用 MCMC 算法进行拟合；[e]单位为10^{53} erg，用(1)式拟合结果，采用 MCMC 算法进行拟合；[f]单位为10^{53} erg。

我们通过拟合得到了 F_{X0}，于是缓慢下降结束时对应的光度为[58]

$$L_X = \frac{4\pi D_L^2(z) F_{X0}}{(1+z)^{1-\beta_X}}, \tag{3}$$

其中，z 为红移；D_L 为光度距离。z 和 β_X 从 Swift 伽马暴数据库参数表网站(https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table/)获取。我们注意到在 Swift 伽马暴数据库参数表网站中，有时会给出两个红移值。在这里我们选取的红移值与文[54]一致。本文采用平坦的宇宙学模型 ΛCDM，取 $H_0=70.0$ km · s^{-1} · Mpc^{-1}和 $\Omega_M=0.286$ 计算光度距离 $D_L(z)$，

$$D_L(z, \Omega_M, \Omega_\Lambda) = \frac{c(1+z)}{H_0}\int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3+\Omega_\Lambda}}, \tag{4}$$

其中，$\Omega_\Lambda = 1-\Omega_M$；$c$ 为光速。

静止参考系中，观测到的瞬时辐射的各向同性伽马射线能量($E'_{\gamma,iso}$)由

$$E'_{\gamma,iso} = \frac{4\pi D_L^2 S}{1+z} \tag{5}$$

计算，其中，S 为爆发预警望远镜(Swift/BAT)通量，能量范围为(15~150 keV)，以 erg · cm^{-2}为单位，也取自 Swift 伽马暴数据库参数表。

通过(5)式计算 $E'_{\gamma,iso}$是不准确的，因为宇宙学时间的膨胀，Swift 伽马暴的观测坐标系的 15~150 keV 能道不同于具有红移的静止坐标系能道[59]。因此，在我们的计算中应该考虑所谓的 K-correction 改正。考虑 k 改正效应后，修正后的伽马射线暴各向同性能量为

$$E_{\gamma,\mathrm{iso}} = E'_{\gamma,\mathrm{iso}} \times \frac{\int_{15/1+z}^{150/1+z} E\Phi(E)\,\mathrm{d}E}{\int_{15}^{150} E\Phi(E)\,\mathrm{d}E}\,, \tag{6}$$

其中，$\Phi(E)$是伽马暴的能谱函数。通常，伽马暴瞬时辐射的峰值能量范围在~200-300 keV。由于Swift上爆发预警望远镜探测器的波段(15~150 keV)和Swift/XRT探测器的波段(0.2~10 keV)的能量范围相对较窄，我们采用单一的幂律谱模型，即$\Phi(E)=E^{\gamma}$，其中γ为光谱指数，也是从Swift伽马暴数据库参数表中得到。用于计算本文中的k改正的范围为(1.00，1.16)。

2 分析结果

2.1 两类暴“平台期”和随后“正常下降”参数的比较

通过拟合光变曲线我们获得了两类暴的光变特性参数，包括α_1，α_2，$\Delta\alpha$，T_a，L_x和$E_{\gamma,\mathrm{iso}}$。图2分别给出了长伽马暴和短伽马暴的光变特性参数α_1，α_2，$\Delta\alpha$和T_a的分布。

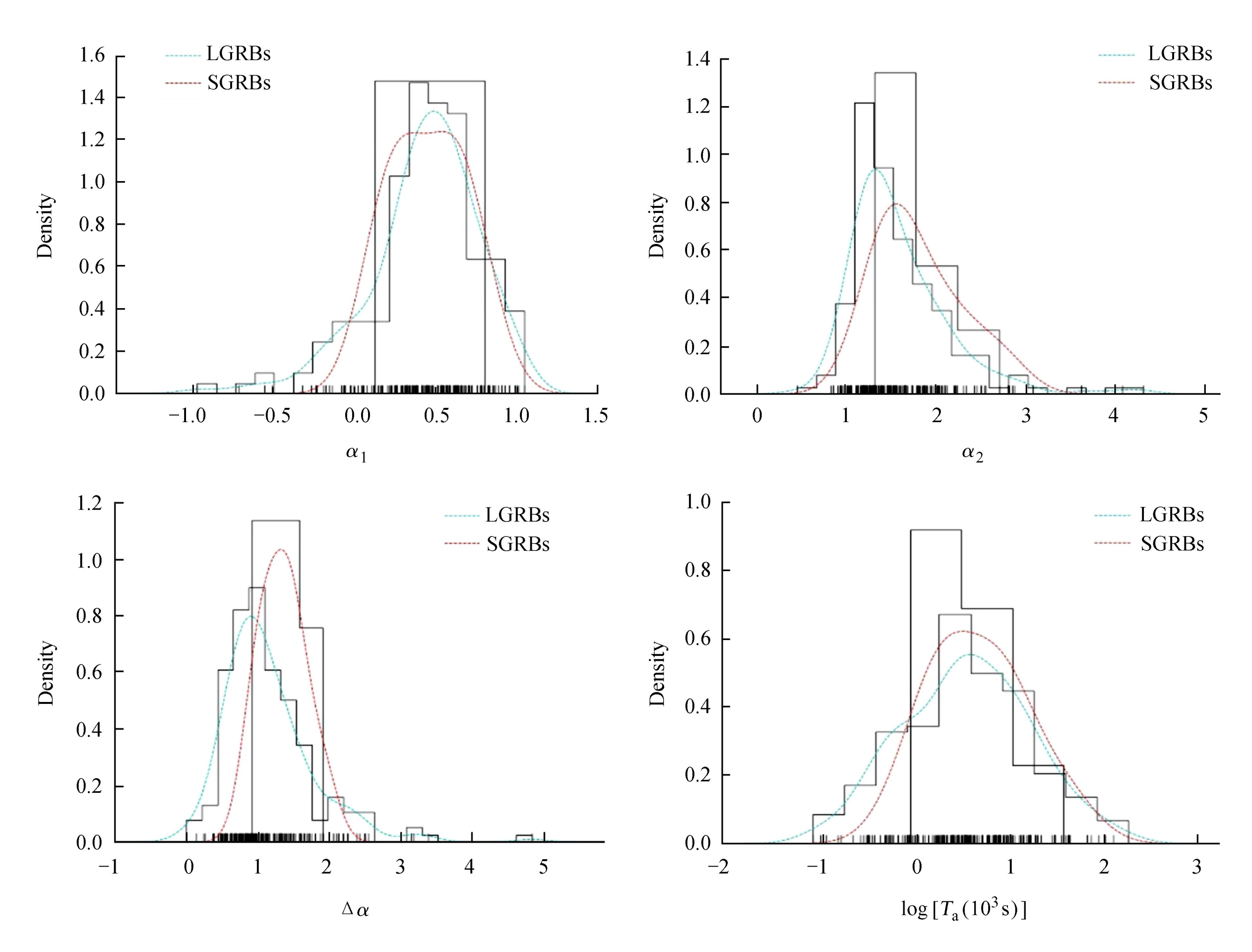


图2 两类暴光变特性参数α_1，α_2，$\Delta\alpha$和T_a的分布，蓝绿色曲线是短伽马暴的拟合线，红色曲线是长伽马暴的拟合线

Fig. 2 The distributions of two types of light curve characteristic parameters α_1, α_2, $\Delta\alpha$, and T_a, where the blue-green curve and the red curve are the fitting lines of SGRBs and LGRBs, respectively

通过图2可以清晰地看出，对于我们样本中的长暴和短暴，平台阶段指数α_1、正常衰减阶段指数α_2、缓慢下降阶段和随后下降阶段斜率的改变量$\Delta\alpha$以及缓慢衰减阶段的持续时间T_a都呈现单峰分布。表3分别给出了两类暴α_1，α_2，$\Delta\alpha$和T_a的分布范围、平均值以及中值，我们发现长伽马暴和短伽马暴的α_1，α_2，$\Delta\alpha$和T_a的平均值和中值十分接近。

为了进一步比较长伽马暴和短伽马暴的光变特性参数，我们进行了 K-S 检验，以检查这些参数的分布是否相同。表 4 列出了 K-S 检验的结果。我们发现，对于 α_1，α_2，$\Delta\alpha$ 和 T_a，两类暴检验得到的 p 值都大于 10^{-4}，由此我们可以判定两类暴的 α_1，α_2，$\Delta\alpha$ 和 T_a 没有显著差异。

2.2　两类暴的两参数关系

我们发现选取的样本中长伽马暴和短伽马暴的两个参数之间可能存在一些相关性。图 3 展示了两类暴的 L_X 和 T_a，L_X 和 $E_{\gamma,iso}$，S 和 T_{90}，$E_{\gamma,iso}$ 和 T_{90}的相关关系。

由图 3 可以看出，这几对参数的分布有一定的关联。L_X-T_a 的最佳拟合关系为 $\log(L_X/10^{47}\,\mathrm{erg\cdot s^{-1}})=(1.40\pm0.09)+(-1.44\pm0.11)\log(T_a/10^3\,\mathrm{s})$。斯皮尔曼(Spearman)相关系数为-0.72，置信概率 $p<10^{-4}$。我们可以看出，两类暴缓慢衰减阶段的持续时间 T_a 与缓慢下降阶段结束时刻对应的光度 L_X 成反相关关系。对于 $L_X-E_{\gamma,iso}$，最佳拟合关系为 $\log(L_X/10^{47}\,\mathrm{erg\cdot s^{-1}})=(0.48\pm0.06)+(1.16\pm0.06)\log(E_{\gamma,iso}/10^{53}\,\mathrm{erg})$。斯皮尔曼相关系数为 0.739，置信概率 $p=2.408\times10^{-32}$，因此，两类暴缓慢下降阶段结束时刻对应的光度 L_X 与各向同性能量 $E_{\gamma,iso}$之间存在正相关关系。除此以外，我们发现两类暴的 S，$E_{\gamma,iso}$与 T_{90}存在正相关关系。其中，$S-T_{90}$的最佳拟合结果为 $\log(S/10^{-7}\,\mathrm{erg\cdot cm^{-2}})=(0.45\pm0.10)+(0.52\pm0.05)\log(T_{90}/\mathrm{s})$，斯皮尔曼相关系数为 0.57，置信概率 $p<10^{-4}$。$E_{\gamma,iso}-T_{90}$的最佳拟合关系为 $\log(E_\gamma/10^{53}\,\mathrm{erg})=(-1.14\pm0.15)+(0.78\pm0.15)T_{90}/\mathrm{s})$，斯皮尔曼相关系数为 0.47，置信概率 $p<10^{-4}$。由 $S-T_{90}$和 $E_{\gamma,iso}-T_{90}$的关系可以看出，观测到的伽马射线暴的持续时间越长，能量/能流越高。

表 3　长暴与短暴平台期以及随后下降各参数的分布范围、中值和平均值

Table 3　The range, median, and average values of platform periods and subsequent decline parameters of the two types of GRBs

Parameter	LGRBs/SGRBs	Range	Median	Average
T_a	LGRB	7.6×10^3 s, 1.83×10^5	3.328×10^3	10.74×10^4
	SGRB	8.5×10^2 s, 3.7×10^4	4.91×10^3	8.68×10^3
α_1	LGRB	−0.974, 1.042	0.457	0.427
	SGRB	0.122, 0.799	0.4415	0.448
α_2	LGRB	0.441, 4.318	1.453	1.58
	SGRB	1.306, 2.707	1.608	1.80
$\Delta\alpha$	LGRB	0.92, 1.91	1.02	1.16
	SGRB	0.0, 4.83	1.365	1.35

表 4　两类暴缓慢下降以及随后下降各参数的 K-S 检验 *D* 值以及 *p* 值

Table 4　K-S test results of the two types of GRBs with slow decline and subsequent decline

K-S Test	D value	p value
T_a	0.232 6	0.725
α_1	0.156 9	0.977
α_2	0.366 3	0.202
$\Delta\alpha$	0.427 0	0.089

此外，在图 3 中我们用黑圆点标记长伽马暴，用红圆点标记短伽马暴，以便观察这两类伽马暴是否存在差异。从图 3 我们可以看到，长伽马暴和短伽马暴的 L_X和 T_a，L_x和 $E_{\gamma,iso}$，S 和 T_{90}，$E_{\gamma,iso}$和 T_{90}的相关关系是一致的，基本分布在最佳拟合结果附近。由于两类暴的 L_X和 T_a，L_x和 $E_{\gamma,iso}$，S 和 T_{90}，$E_{\gamma,iso}$和 T_{90}的相关关系没有呈现明显的差异，因此我们推测，这两类伽马暴在本质上可能是相同的一类暴，因而它们的喷流结构也可能相同。

3　讨　论

由于伽马暴的分类和物理起源等问题还不清楚，本文主要从伽马暴 X 射线余辉的时间特性出发，通过使用平滑拐折幂律函数拟合具有缓慢下降以及随后正常下降的两类伽马暴的 X 射线余辉光变曲线，得出并比较两类暴的 X 射线余辉时间特性参数，从而推断这两类伽马暴喷流结构的物理起源是否一致。我们选择 180 个包含已知红移的伽马暴样本，其中长伽马暴 172 个，短伽马暴 8 个。我们使用马尔可夫链蒙特卡罗方法以及卡方检验对这些包含平台的余辉数据进行拟合，从而获得了光变特性参数 α_1，α_2 和 T_a 并通过计算得出 L_x 和 $E_{\gamma,iso}$。

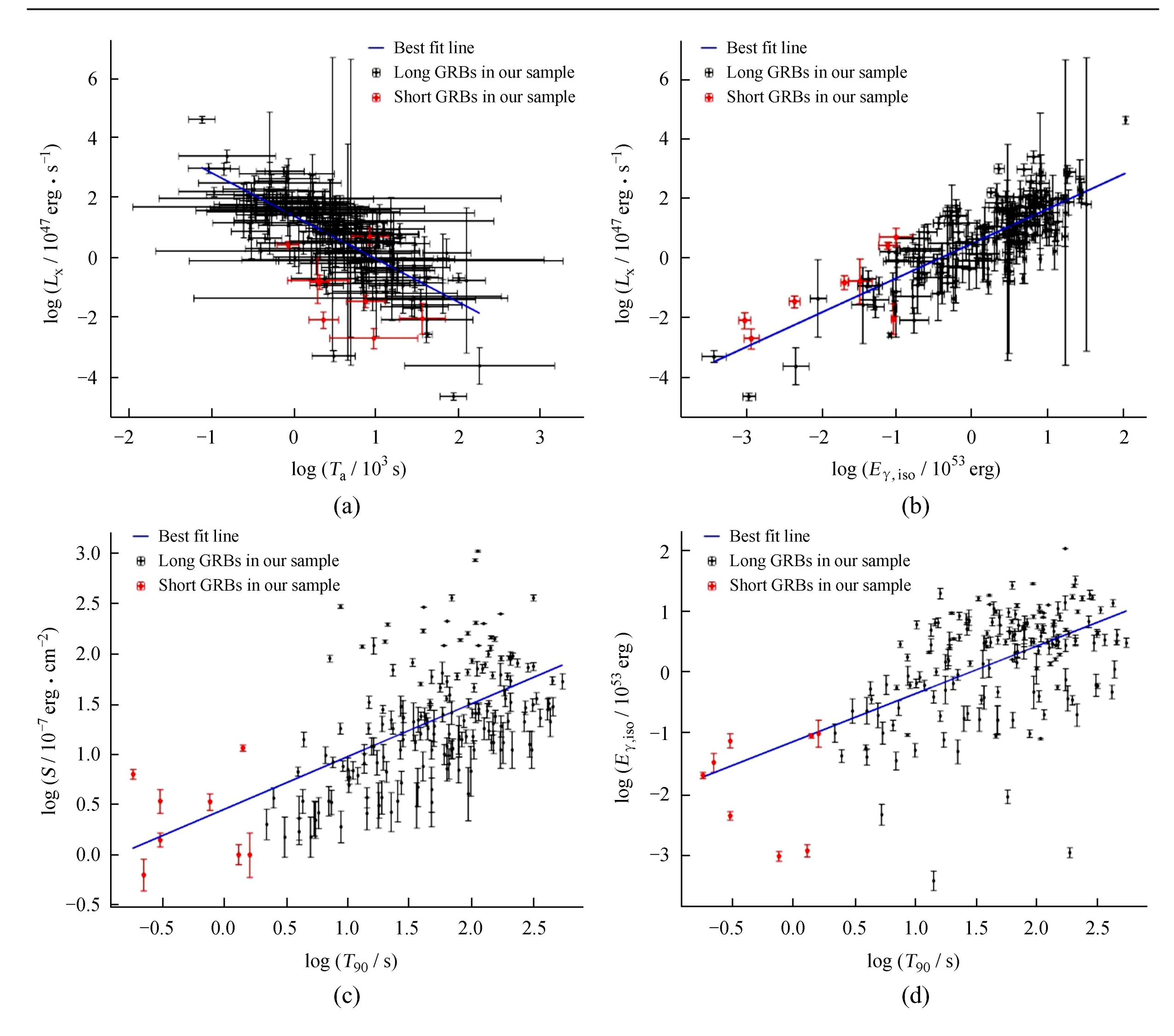


图 3 两类暴的两参数关系的对数分布图。(a)L_X-T_a；(b)$L_X-E_{\gamma,iso}$；(c)$S-T_{90}$；(d)$E_{\gamma,iso}-T_{90}$。黑圆点是长伽马暴，红圆点是短伽马暴，蓝色实线为最佳拟合线

Fig. 3 Two parameters relationship diagram for two types of GRBs. (a)L_X-T_a; (b)$L_x-E_{\gamma,iso}$; (c)$S-T_{90}$; (d)$E_{\gamma,iso}-T_{90}$. The black and red dots are the LGRBs and SGRBs, respectively, and the solid blue lines are the best fit line

我们首先比较了长短暴 X 射线余辉光变曲线的参数 α_1，α_2 和 T_a 是否存在差异，通过对两类暴的均值、中值以及 K-S 检验后发现，两类暴的光变特性参数分布没有显著差异。

我们也对比了静止坐标系下 180 个伽马暴的缓慢衰减结束时间 T_a、平台结束时对应的光度 L_x、各向同性能量 $E_{\gamma,iso}$的分布情况。我们的研究发现，缓慢下降结束时间 T_a、平台结束时对应的光度 L_x、各向同性能量 $E_{\gamma,iso}$的分布都接近一个单峰分布。这些参数的分布范围与文[50]和文[54]样本的参数结果非常接近，说明我们的分析结果和前人的结果一致。

文[47]分析了 77 个伽马暴，发现在静止坐标系中缓慢衰减阶段的结束时间($T_{a,z}$)与对应的 X 射线光度($L_{x,a}$)之间存在负相关关系，即 $L_{x,a}\propto T_{a,z}^{-1.06\pm0.27}$。我们的研究发现，当使用一个更大的样本重新分析这两个量的相关性时，两参数相关性也存在，斯皮尔曼相关系数 ρ 为-0.72，置信概率 $p<10^{-4}$，可以看出该相关性是很强的。随后，文[49]通过已知红移的 62 个长 Swift 伽马暴样本，将 $L_{X,a}$-$T_{a,z}$的相关性扩展到瞬时辐射之间，并发现 $L_{X,a}$与瞬时辐射平均光度 $L_{P,45}$存在相关性，即 $L_{X,a}\propto L_{p,45}^{0.7}$。文[50]进一步发现 $T_{a,z}$，$L_{X,a}$和瞬时辐射的各向同性能量($E_{\gamma,iso}$)之间存在更紧密的三参数相关性(简称为 L-T-E 关系)。文[51]建立了瞬时辐射中 $T_{a,z}$，$L_{X,a}$和峰值光度(L_P)之间的另一个三参数相关性。

文[53]分析了 50 个在光学余辉光变曲线中具有缓慢衰减阶段的伽马暴，发现样本具有相似的三参数 L-T-E 相关性。后来，文[54]分析了 174 个具有缓慢衰减阶段和已知红移的 Swift 伽马暴大样本，并测试了 L-T-E 的相关性。

从理论上看，目前文献中提出了大量的模型试图解释 X 射线平台。文[60]提出了伽马暴的毫秒原磁星模型，在该磁星模型中，偶极子辐射释放的能量预计通过磁星风传递到周围环境。这种风是大质量恒星核心坍缩产生超新星激波后，由中微子加热形成的。通过与前身星的相互作用，流出物被准直成双极喷流。随着磁星冷却，变成极端相对论，坡印亭通量在时间尺度上占主导地位，时间尺度与喷流清除恒星空腔所需的时间相当。因此，在这个模型中，磁耗散和激波解释了瞬时辐射和随后的陡峭衰减阶段。晚期的耀发或余辉辐射，例如 X 射线平台，被认为是由持续的磁场或剩余的旋转能量提供动力。事实上，文[61]用这个模型解释了 1σ 不确定性内的光度和平台期持续时间之间的相关性，其中磁场和快速旋转中子星的自转周期是典型的。随后，文[62]的研究表明，只有在具有高磁场强度的超磁星中，磁星模型才能在伽马射线暴平台辐射内一致。

文[63]首次将自转磁星的非理想模型拟合到余辉数据中，统计样本为 40 个具有明确平台的长伽马射线暴和 13 个短伽马射线暴，包括具有扩展辐射的短伽马射线暴，得出的结论是短伽马射线暴和长伽马射线暴都可以用磁星模型解释。在本文中长暴和短暴的 α_1 和 α_2 分布都是单峰分布，而且两类暴的 α_1 和 α_2 分布没有明显的差异。同样的，长暴和短暴的 T_a 和 L_x 分布都是单峰分布且无明显差异。这些结果似乎表明，两类暴是同一起源且都可以用磁星模型解释。

文[64]显示了在一些短伽马射线暴中看到的扩展辐射与平台期之间的联系。他们假设一个来自中心致密物体(如磁星)的持续能量注入，作为两个辐射阶段的起源。在一些长伽马射线暴中也报道了这种持续 $10^2 \sim 10^3$s 的扩展辐射。文[65]认为，在少数情况下，平台期之后会出现急剧衰减，之后可能出现第 2 个平台期。他们将此解释为中央引擎的结果，该引擎由一个快速旋转的磁星组成，该磁星坍缩成一个新生的黑洞。

与之前的工作相反，文[66]认为，如果新生磁星的磁场处于瞬态的快速衰减阶段，则可能无法实现清晰的平台阶段。由于这个阶段自转减慢，功率可能会下降得较快，因此导致缺乏平稳阶段。基于这种想法，他们分析了 6 个伽马射线暴的 X 射线光变曲线没有平台，并得出结论，这些伽马射线暴宿主可能是毫秒磁星。

文[67-68]提出了一种不同类型的模型，其中平台期、耀发和可能的陡坡都是由反向激波主导解释的[69]。这种反向激波不同于“火球”模型中预测的经典反向激波，因为它被认为是通过极端相对论性的、高磁化的脉冲星状风传播的，这种风由持久的中央发动机产生。该想法虽然有趣，但到目前为止，只有极少数观测到的伽马射线暴似乎符合这个模型的预测。此外，这些伽马暴在其 X 射线余辉中有多个耀发，因此很难得出确切的结论。在经典“火球”模型的范围内[70-71]，从滑行到相似阶段的过渡过程中，反向激波的贡献是预期的。事实上，在文献中我们确实看到了一些伽马射线暴的光变曲线可能是来自反向激波的证据(如 GRB 110213A)。

文[72-73]提出的另一个模型是从离轴角度看结构喷流。这些工作的目的是从极低光度 GRB/GW 170817A 中检测离轴喷流。文[72]通过高纬度辐射解释了平台期，文[73]认为在近核心视线上存在结构化喷流。因此这些平台将会被大量的观察者看到，并持续 $10^2 \sim 10^5$s。它自然地再现了观测到的时间尺度和光度分布，以及平台持续时间、平台光度和瞬时 γ 射线能量之间的相关性。在本文中两类暴也存在 L_X-T_a 和 L_X-$E_{\gamma,iso}$ 相关性，这可能表明两类暴是同一起源，因而可以推断它们的物理机制应该相同。

由本文得出两类暴的光变特性参数具有相似的分布，且文[63]得出的结论是具有缓慢下降阶段的两类暴可以在磁星模型中解释，文[73]提出的模型自然地解释了平台的持续时间和光度，以及瞬时 γ 射线能量之间的相互相关性。这些证据表明，长暴和短暴可能是同一起源。

因此，如果我们想要了解更多长暴和短暴的性质，还需要更大的样本进行深入研究。

4 结 论

本文使用平滑拐折幂律函数对拥有缓慢下降以及随后下降成分的两类爆发事件进行时间光变特性曲线分析。通过对 X 射线余辉光变特性分析发现，两类暴的光变曲线中都含有缓慢下降以及随后下降的成分。我们对比分析了两类暴的光变特性参数得到以下有趣的结论：

(1)我们选择的两类暴的 X 射线余辉光变特性参数 α_1，α_2，$\Delta\alpha$ 和 T_a 的分布都是单峰的。

(2)我们得出了两类暴光变特性参数的范围、中值和均值：$\alpha_1^L(-0.974, 1.042)$，0.457，0.427；$\alpha_1^S(0.122, 0.799)$，0.4415，0.448；$\alpha_2^L(0.441, 4.318)$，1.453，1.58；$\alpha_2^S(1.306, 2.707)$，1.608，1.80；$T_a^L(0.85\times10^3\,s, 3.68\times10^4\,s)$，$4.91\times10^3\,s$，$8.68\times10^3\,s$；以及两类暴光变特性参数的 K-S 检验 p 值，α_1 为 0.977，α_2 为 0.202，T_a 为 0.725，其值均大于 10^{-4}，这些值表明两类暴的光变特性参数分布没有显著差异。

(3)我们还发现 X 射线缓慢下降阶段的拐折时间从几十秒到 $10^6\,s$ 不等，典型值约为 $10^3\,s$，对应的光度(L_X)主要在 $10^{44}\,erg\cdot s^{-1}$ 到 $10^{47}\,erg\cdot s^{-1}$ 之间，一般比光学余辉平台对应的光度要高两到三个数量级，这支持了文[53]的观点。

(4)同时我们还发现选取的两类暴样本中存在一些有趣的两参数相关性如 L_x-T_a(Dainotti 关系)：$\log(L_x/10^{47}\,erg\cdot s^{-1})=(1.40\pm0.09)+(-1.44\pm0.11)\log(T_a/10^3\,s)$，其斯皮尔曼相关系数为-0.72，置信概率 $p=1.42\times10^{-30}$；$L_x-E_{\gamma,iso}$：$\log(L_x/10^{47}\,erg\cdot s^{-1})=(0.48\pm0.06+(1.16\pm0.06)\log(E_\gamma/10^{53}\,erg)$，斯皮尔曼相关系数 ρ 为 0.739，置信概率为 $p=2.408\times10^{-32}$；$S-T_{90}$：$\log(S/10^{-7}\,erg\cdot cm^{-2})=(0.45\pm0.10)+(0.52\pm0.05)\log(T_{90}/s)$，斯皮尔曼相关系数 ρ 为 0.57，置信概率为 $p=5.90\times10^{-17}$；$E_{\gamma,iso}-T_{90}$：$\log(E_\gamma/10^{53}\,erg)=(-1.14\pm0.15)+(0.78\pm0.15)\log(T_{90}/s)$，Spearman 相关系数 ρ 为 0.47，置信概率为 $p<10^{-4}$，且两类暴的两参数相关关系没有显著差异。

以上的研究结果表明，两类暴的 X 射线余辉光变特性在参数分布和两参数相关关系上具有相似的特征，这也为两类伽马暴可能是同一物理起源提供支持。

参考文献：

[1] BAND D, MATTESON J, FORD L, et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I-Spectral diversity [J]. The Astrophysical Journal, 1993, 413: 281-292.

[2] LEVAN A J, TANVIR N R, STARLING R L C, et al. A new population of ultra-long duration gamma-ray bursts [J]. The Astrophysical Journal, 2013, 781(1): 13.

[3] KUMAR P, ZHANG B. The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets [J]. Physics Reports, 2015, 561: 1-109.

[4] KOUVELIOTOU C, MEEGAN C A, FISHMAN G J, et al. Identification of two classes of gamma-ray bursts [J]. The Astrophysical Journal, 1993, 413: L101-L104.

[5] BROMBERG O, NAKAR E, PIRAN T. Short versus long and collapsars versus non-collapsars: a quantitative classification of gamma-ray bursts [J]. The Astrophysical Journal, 2013, 764(2): 179.

[6] MACFADYEN A I, WOOSLEY S E. Collapsars: gamma-ray bursts and explosions in "failed supernovae" [J]. The Astrophysical Journal, 1999, 524(1): 262.

[7] STANEK K Z, MATHESON T, GARNAVICH P M, et al. Spectroscopic discovery of the supernova 2003dh associated with GRB 030329 [J]. The Astrophysical Journal, 2003, 591(1): L17.

[8] XU D, DE UGARTE POSTIGO A, LELOUDAS G, et al. Discovery of the broad-lined type Ic SN 2013cq associated with the very energetic GRB 130427A [J]. The Astrophysical Journal, 2013,

776(2): 98.

[9] PACZYNSKI B. Gamma-ray bursters at cosmological distances [J]. The Astrophysical Journal, 1986, 308: L43-L46.

[10] PACZYNSKI B. Cosmological gamma-ray bursts [J]. Acta Astronomica, 1991, 41: 257-267.

[11] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2017, 848(2): L13.

[12] GOLDSTEIN A, VERES P, BURNS E, et al. An ordinary short gamma-ray burst with extraordinary implications: Fermi-GBM detection of GRB 170817A [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2017, 848(2): L14.

[13] ZHANG B. The physics of gamma-ray bursts [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

[14] REES M J, MÉSZÁROS P. Relativistic fireballs: energy conversion and time-scales [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1992, 258(1): 41P-43P.

[15] PIRAN T, SHEMI A, NARAYAN R. Hydrodynamics of relativistic fireballs [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1993, 263(4): 861-867.

[16] WIJERS R A M J, REES M J, MÉSZÁROS P. Shocked by GRB 970228: the afterglow of a cosmological fireball [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1997, 288(4): L51-L56.

[17] MÉSZÁROS P. Gamma-ray bursts [J]. Reports on Progress in Physics, 2006, 69(8): 2259.

[18] MÉSZÁROS P. Gamma-ray bursts [J]. Astroparticle Physics, 2013, 43: 134-141.

[19] MÉSZÁROS P, REES M J. Optical and long-wavelength afterglow from gamma-ray bursts [J]. The Astrophysical Journal, 1997, 476(1): 232.

[20] SARI R. Hydrodynamics of gamma-ray burst afterglow [J]. The Astrophysical Journal, 1997, 489(1): L37-L40.

[21] TAVANI M. X-ray afterglows from gamma-ray bursts [J]. The Astrophysical Journal, 1997, 483(2): L87.

[22] VIETRI M. The afterglow of gamma-ray bursts: the cases of GRB 970228 and GRB 970508 [J]. The Astrophysical Journal, 1997, 488(2): L105.

[23] WAXMAN E. Gamma-ray-burst afterglow: supporting the cosmological fireball model, constraining parameters, and making predictions [J]. The Astrophysical Journal, 1997, 485(1): L5.

[24] HUANG Y F, DAI Z G, LU T. A generic dynamical model of gamma-ray burst remnants [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1999, 309(2): 513-516.

[25] HUANG Y F, GOU L J, DAI Z G, et al. Overall evolution of jetted gamma-ray burst ejecta [J]. The Astrophysical Journal, 2000, 543(1): 90.

[26] METZGER M R, DJORGOVSKI S G, KULKARNI S R, et al. Spectral constraints on the redshift of the optical counterpart to the γ-ray burst of 8 May 1997 [J]. Nature, 1997, 387(6636): 878-880.

[27] CUCCHIARA A, LEVAN A J, FOX D B, et al. A photometric redshift of $z \sim 9.4$ for GRB 090429B [J]. The Astrophysical Journal, 2011, 736(1): 7.

[28] ZHANG B, FAN Y Z, DYKS J, et al. Physical processes shaping gamma-ray burst X-ray afterglow light curves: theoretical implications from the Swift X-ray telescope observations [J]. The Astrophysical Journal, 2006, 642(1): 354.

[29] NOUSEK J A, KOUVELIOTOU C, GRUPE D, et al. Evidence for a canonical gamma-ray burst afterglow light curve in the Swift XRT data [J]. The Astrophysical Journal, 2006, 642(1): 389.

[30] DAI Z G, LU T. Gamma-ray burst afterglows and evolution of postburst fireballs with energy injection from strongly magnetic millisecond pulsars [J]. Astronomy and Astrophysics, 1998, 333: L89-L90.

[31] ZHANG B, MÉSZÁROS P. Gamma-ray burst afterglow with continuous energy injection: signature of a highly magnetized millisecond pulsar [J]. The Astrophysical Journal, 2001, 552(1): L35.

[32] ROWLINSON A, O'BRIEN P T, TANVIR N R, et al. The unusual X-ray emission of the short Swift GRB 090515: evidence for the formation of a magnetar? [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 409(2): 531-540.

[33] ROWLINSON A, O'BRIEN P T, METZGER B D, et al. Signatures of magnetar central engines in short GRB light curves [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 430(2): 1061-1087.

[34] BUCCIANTINI N, METZGER B D, THOMPSON T A, et al. Short gamma-ray bursts with extended emission from magnetar birth: jet formation and collimation [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 419(2): 1537-1545.

[35] GOMPERTZ B P, O'BRIEN P T, WYNN G A, et al. Can magnetar spin-down power extended emission in some short GRBs? [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 431(2): 1745-1751.

[36] GENG J J, WU X F, HUANG Y F, et al. Imprints of electron-positron winds on the multi-wavelength afterglows of gamma-ray bursts [J]. The Astrophysical Journal, 2016, 825(2): 107.

[37] USO V V. Millisecond pulsars with extremely strong magnetic fields as a cosmological source of γ-ray bursts [J]. Nature, 1992, 357(6378): 472-474.

[38] THOMPSON C. A model of gamma-ray bursts [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1994, 270(3): 480-498.

[39] POPHAM R, WOOSLEY S E, FRYER C. Hyperaccreting black holes and gamma-ray bursts [J]. The Astrophysical Journal, 1999, 518(1): 356.

[40] ROSSWOG S, RAMIREZ-RUIZ E, DAVIES M B. High-resolution calculations of merging neutron stars-III. Gamma-ray bursts [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2003, 345(4): 1077-1090.

[41] LEI W H, ZHANG B, LIANG E W. Hyperaccreting black hole as gamma-ray burst central engine. I. Baryon loading in gamma-ray burst jets [J]. The Astrophysical Journal, 2013, 765(2): 125.

[42] GOMPERTZ B P, O'BRIEN P T, WYNN G A. Magnetar powered GRBs: explaining the extended emission and X-ray plateau of short GRB light curves [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 438(1): 240-250.

[43] LÜ H J, ZHANG B. A test of the millisecond magnetar central engine model of gamma-ray bursts with Swift data [J]. The Astrophysical Journal, 2014, 785(1): 74.

[44] LÜ H J, ZHANG B, LEI W H, et al. The millisecond magnetar central engine in short GRBs [J]. The Astrophysical Journal, 2015, 805(2): 89.

[45] CHEN W, XIE W, LEI W H, et al. Signature of a newborn black hole from the collapse of a supra-massive millisecond magnetar [J]. The Astrophysical Journal, 2017, 849(2): 119.

[46] HOU S J, LIU T, XU R X, et al. The X-ray light curve in GRB 170714A: evidence for a quark star? [J]. The Astrophysical Journal, 2018, 854(2): 104.

[47] DAINOTTI M G, CARDONE V F, CAPOZZIELLO S. A time-luminosity correlation for γ-ray bursts in the X-rays [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, 391(1):

L79-L83.

[48] DAINOTTI M G, WILLINGALE R, CAPOZZIELLO S, et al. Discovery of a tight correlation for gamma-ray burst afterglows with "canonical" light curves [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2010, 722(2): L215.

[49] DAINOTTI M G, OSTROWSKI M, WILLINGALE R. Towards a standard gamma-ray burst: tight correlations between the prompt and the afterglow plateau phase emission [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 418(4): 2202-2206.

[50] XU M, HUANG Y F. New three-parameter correlation for gamma-ray bursts with a plateau phase in the afterglow [J]. Astronomy and Astrophysics, 2012, 538: A134.

[51] DAINOTTI M G, POSTNIKOV S, HERNANDEZ X, et al. A fundamental plane for long gamma-ray bursts with X-ray plateaus [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2016, 825(2): L20.

[52] DAINOTTI M G, HERNANDEZ X, POSTNIKOV S, et al. A study of the gamma-ray burst fundamental plane [J]. The Astrophysical Journal, 2017, 848(2): 88.

[53] SI S K, QI Y Q, XUE F X, et al. The three-parameter correlations about the optical plateaus of gamma-ray bursts [J]. The Astrophysical Journal, 2018, 863(1): 50.

[54] TANG C H, HUANG Y F, GENG J J, et al. Statistical study of gamma-ray bursts with a plateau phase in the X-ray afterglow [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2019, 245(1): 1.

[55] GEHRELS N, CHINCARINI G, GIOMMI P, et al. The Swift gamma-ray burst mission [J]. The Astrophysical Journal, 2004, 611(2): 1005.

[56] LI L, LIANG E W, TANG Q W, et al. A comprehensive study of gamma-ray burst optical emission. I. Flares and early shallow-decay component [J]. The Astrophysical Journal, 2012, 758(1): 27.

[57] YI S X, XI S Q, YU H, et al. Comprehensive study of the X-ray flares from gamma-ray bursts observed by Swift [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2016, 224(2): 20.

[58] WILLINGALE R, O'BRIEN P T, OSBORNE J P, et al. Testing the standard fireball model of gamma-ray bursts using late X-ray afterglows measured by Swift [J]. The Astrophysical Journal, 2007, 662(2): 1093.

[59] BLOOM J S, FRAIL D A, SARI R. The prompt energy release of gamma-ray bursts using a cosmological k-correction [J]. The Astronomical Journal, 2001, 121(6): 2879.

[60] METZGER B D, GIANNIOS D, THOMPSON T A, et al. The protomagnetar model for gamma-ray bursts [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 413(3): 2031-2056.

[61] ROWLINSON A, GOMPERTZ B P, DAINOTTI M, et al. Constraining properties of GRB magnetar central engines using the observed plateau luminosity and duration correlation [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 443(2): 1779-1787.

[62] REA N, GULLÓN M, PONS J A, et al. Constraining the GRB-magnetar model by means of the galactic pulsar population [J]. The Astrophysical Journal, 2015, 813(2): 92.

[63] STRATTA G, DAINOTTI M G, DALL'OSSO S, et al. On the magnetar origin of the GRBs presenting X-ray afterglow plateaus [J]. The Astrophysical Journal, 2018, 869(2): 155.

[64] MATSUMOTO T, KIMURA S S, MURASE K, et al. Linking extended and plateau emissions of short gamma-ray bursts [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 493(1): 783-791.

[65] ZHAO L T, LIU L D, GAO H, et al. The second plateau in X-ray afterglow providing additional evidence for rapidly spinning magnetars as the GRB central engine [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 896(1): 42.

[66] ÇİKİNTOĞLU S, ŞAŞMAZ MUŞ S, EKŞI K Y. The initial evolution of millisecond magnetars:

an analytical solution [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 496(2): 2183-2190.

[67] LYUTIKOV M, JARAMILLO J C. Early GRB afterglows from reverse shocks in ultra-relativistic, long-lasting winds [J]. The Astrophysical Journal, 2017, 835(2): 206.

[68] BARKOV M V, LUO Y, LYUTIKOV M. Dynamics and emission of wind-powered afterglows of gamma-ray bursts: flares, plateaus, and steep decays [J]. The Astrophysical Journal, 2021, 907(2): 109.

[69] SARU R, PIRAN T, NARAYAN R. Spectra and light curves of gamma-ray burst afterglows [J]. The Astrophysical Journal, 1998, 497(1): L17.

[70] UHM Z L, BELOBORODOV A M. On the mechanism of gamma-ray burst afterglows [J]. The Astrophysical Journal, 2007, 665(2): L93.

[71] GENET F, DAIGNE F, MOCHKOVITCH R. Can the early X-ray afterglow of gamma-ray bursts be explained by a contribution from the reverse shock? [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, 381(2): 732-740.

[72] OGANESYAN G, ASCENZI S, BRANCHESI M, et al. Structured jets and X-ray plateaus in gamma-ray burst phenomena [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 893(2): 88.

[73] BENIAMINI P, DUQUE R, DAIGNE F, et al. X-ray plateaus in gamma-ray bursts′ light curves from jets viewed slightly off-axis [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 492(2): 2847-2857.

A Comparative Study on the Characteristics of X-ray Afterglow Variation in Two Types of Gamma Bursts

Meng Jian, Peng Zhaoyang*, Chen Jiaming

(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China, Email: pengzhaoyang412@163.com)

Abstract: The classification of gamma-ray bursts (GRBs) is an unsolved hot issue in the field of GRBs. To solve this problem, we collected a samples of X-ray afterglow curves including 180 known redshift GRBs observed by Swift with slow attenuation and subsequent attenuation characteristics, in which there are 172 Long GRBs and 8 Short GRBs. We adopt the smooth broken power law function and the Markov chain Monte Carlo (MCMC) method to fit these X-ray afterglow light curves. After obtaining these light curve characteristic parameters α_1 (slow decay index), α_2 (normal attenuation index), and T_a (slow attenuation end time in rest frame), we analyze the characteristic parameters of the two types of bursts to check whether there are differences in the distribution of these parameters and whether the two types of storms follow the same correlation. Our research findings are as follows: (1) The distribution range, median value, and average value of the characteristic parameters (α_1、α_2, T_a) of two types of bursts are very close, and there is no significant difference. The subsequent K-S test further indicates that there is no significant difference in the distribution of parameters between the two types of bursts. (2) The two types of bursts we selected follow the following correlation: L_x-T_a, $L_x-E_{\gamma,iso}$、$S-T_{90}$、$E_{\gamma,iso}-T_{90}$, and they are not distinguishable on a scatter chart. These statistical results indicate that the optical variability characteristics of the two types of bursts are similar. Therefore, we infer that the two types of GRBs have the same physical origin, and their jet structures may also be the same.

Key words: Gamma-ray burst; X-ray afterglow; light curves fitting; data analysis